

**Ф.В. НОВИКОВ**, д-р техн. наук, профессор, ХНЭУ, Харьков;  
**Р.А. БЕРЕЖНОЙ**, нач. КБ, ОАО ХМЗ «Свет шахтера», Харьков;  
**С.А. ДИТИНЕНКО**, канд. техн. наук, доцент, ХНЭУ, Харьков;  
**Е.И. ИВАНОВ**, канд. техн. наук, доцент, ПГТУ, Мариуполь

## **ИНТЕНСИФИКАЦИЯ ФИНИШНОЙ ОБРАБОТКИ ВНУТРЕННИХ ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ ПОВЕРХНОСТЕЙ ЗУБЧАТЫХ КОЛЕС**

Обґрунтовано умови зменшення основного часу обробки при внутрішньому шліфуванні з урахуванням обмеження по точності розміру оброблюваної поверхні

Обоснованы условия уменьшения основного времени обработки при внутреннем шлифовании с учетом ограничения по точности размера обрабатываемой поверхности

Grounded conditions to reduce the basic processing time for internal grinding, taking into account limitations on the accuracy of the size of the treated surface

**Введение.** При финишной обработке внутренних цилиндрических поверхностей деталей машин возникают проблемы, связанные с высокой трудоемкостью обеспечения требуемых параметров точности обработки [1,2,3]. В особой мере это относится к операциям шлифования внутренних цилиндрических поверхностей зубчатых колес для приводов шахтных конвейеров, точность изготовления которых должна соответствовать 6–7 качеству, радиальное биение – до 0,01 мм, шероховатость поверхности –  $R_a=0,63$  мкм и менее. Как показывает практика, длительность операции внутреннего шлифования зубчатого колеса составляет до трех часов и более. Основной причиной низкой эффективности обработки являются возникающие (из-за низкой жесткости элементов технологической системы) упругие перемещения, которые вызывают значительные погрешности обработки и требуют длительного времени для их устранения. В связи с этим **целью работы** является обоснование условий уменьшения продолжительности обработки при обеспечении заданной точности обрабатываемых поверхностей.

**Основная часть.** Для решения поставленной задачи воспользуемся аналитическими зависимостями для определения упругого перемещения  $u$ , полученными применительно к круглому наружному (внутреннему) шлифованию по жесткой схеме (врезное шлифование со скоростью  $V_0$ ) и по схеме выхаживания [4,5]:

$$y = y_{уст} \cdot \left( 1 - e^{-\frac{\tau}{B}} \right), \quad (1)$$

$$y = y_0 \cdot e^{-\frac{\tau}{B}}, \quad (2)$$

где  $y_{уст} = B \cdot V_0$  – величина упругого перемещения, возникающего в технологической системе в установившемся во времени  $\tau$  процессе шлифования, м;  $B = \frac{\sigma}{c \cdot K_{ш} \cdot V_{кр}} \cdot F$  – постоянная времени образования

упругого перемещения в технологической системе, с;  $c$  – приведенная жесткость технологической системы в радиальном направлении, Н/м;  $K_{ш} = P_z / P_y$  – коэффициент шлифования;  $P_z, P_y$  – соответственно тангенциальная и радиальная составляющие силы резания при шлифовании, Н;  $\sigma$  – условное напряжение резания при шлифовании, Н/м<sup>2</sup>;  $F$  – площадь поперечного сечения обрабатываемого образца, м<sup>2</sup>;  $V_{кр}$  – скорость круга, м/с;  $y_0$  – начальный натяг в технологической системе, м.

При плоском (внутреннем продольном) многопроходном шлифовании по жесткой схеме и по схеме выхаживания величина  $y$  определяется

$$y = y_{уст} \cdot \left( 1 - e^{-\frac{n}{B_1}} \right), \quad (3)$$

$$y = y_0 \cdot e^{-\frac{n}{B_1}}, \quad (4)$$

где  $y_{уст} = B_1 \cdot t$ ;  $t$  – глубина шлифования, м;  $B_1 = \frac{\sigma \cdot H \cdot V_{дет}}{c \cdot K_{ш} \cdot V_{кр}}$  – безразмерный параметр;  $H$  – ширина шлифования, м;  $V_{дет}$  – скорость детали, м/с.

Между параметрами  $B$  и  $B_1$  существует связь

$$B_1 = \frac{B}{\tau_0}, \quad (5)$$

где  $\tau_0 = L / S_{прод}$  – время одного продольного хода круга, с;  $L$  – длина хода круга, м;  $S_{прод}$  – скорость продольной подачи, м/с.

Первоначально определим параметр  $B$  применительно к круглому внутреннему шлифованию по схеме продольного выхаживания отверстия (диаметром 100 мм и высотой 150 мм) зубчатого колеса, изготовленного из стали 18ХГН2МФБ твердостью  $HRC$  57...63. Обработка производилась на внутришлифовальном станке мод. 3К229В абразивным кругом 100х20х63 25А 25 СМ1 8 с режимом шлифования:  $V_{кр} = 35$  м/с;  $V_{дет} = 30$  м/мин;  $S_{прод} = 1,5$  м/мин.

Перебег круга составлял 1/3 его высоты. Время одного продольного хода круга равно  $\tau_0 = 7$  с.

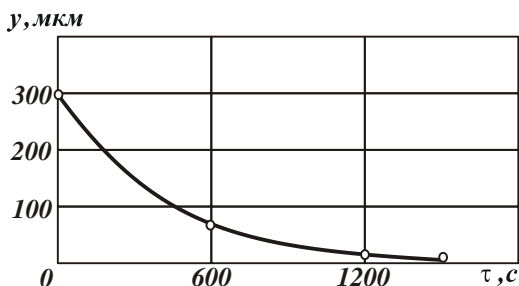


Рисунок 1 – Зависимость величины  $y$  от времени обработки  $\tau$

На рис. 1 приведены экспериментально установленные значения  $y$  с течением времени обработки  $\tau$  при шлифовании по схеме выхаживания с начальным натягом, равным  $y_0 = 0,3$  мм. Как видно, величина  $y$  во времени  $\tau$  непрерывно уменьшается. Подчиним данную закономерность аналитической зависимости (2), для чего разрешим ее относительно параметра  $B = \frac{\tau}{\ln y_0 / y}$ . Расчетами установлено, что параметр  $B$  изменяется в небольших пределах (420...441 с). Это свидетельствует о том, что величина  $y$  изменяется во времени по экспоненциальному закону, описываемому зависимостью (2).

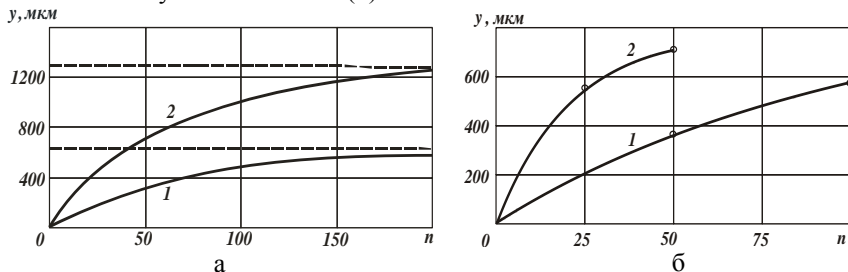


Рисунок 2 – Зависимость величины  $y$  от количества проходов круга  $n$ : 1 –  $t = 0,01$  мм; 2 –  $t = 0,02$  мм; а – расчетные значения; б – экспериментальные значения

Зная параметр  $B$ , на основе зависимости (5) определим безразмерный параметр  $B_1$  для  $\tau_0 = 7$  с. Принимая  $B = 420...441$  с, установлено  $B_1 = 60...63$ . Такие большие значения  $B_1$  свидетельствуют о том, что величина упругого

перемещения  $y$  существенно превышает значения фактической глубины шлифования  $t_\phi$ . Следовательно, при многопроходном внутреннем шлифовании по жесткой схеме (в соответствии с зависимостью (3)) будут образовываться в технологической системе значительные упругие перемещения. Величина  $y_{уст} = B_1 \cdot t = 63 \cdot t$ , входящая в зависимость (3), будет многократно превышать номинальную глубину шлифования  $t$  и даже величину снимаемого припуска, рис. 2,а. Выполнение условия  $t_\phi \rightarrow t$  возможно при весьма большом количестве проходов круга  $n > 3 \cdot B_1 = 190$ . Практически весь процесс съема припуска будет протекать в неуставившемся режиме. Поэтому с целью сокращения трудоемкости обработки целесообразно шлифование вести не по жесткой схеме, которая на заключительном этапе требует продолжительного выхаживания, а по упругой схеме с начальным натягом в системе, кратным величине снимаемого припуска (т.е. весь припуск необходимо снимать по схеме выхаживания).

Для оценки достоверности сделанного вывода были проведены экспериментальные исследования величины упругого перемещения  $y$  в зависимости от количества проходов круга  $n$  при внутреннем шлифовании по жесткой схеме. Как следует из рис. 2,б, имеет место значительное увеличение упругого перемещения  $y$  с увеличением количества проходов круга  $n$ . При  $t=0,02$  мм через 50 проходов круга величина  $y$  достигала значения 0,7 мм, т.е. при врезании круга в обрабатываемую деталь на глубину 1 мм было удалено всего 0,3 мм припуска. При дальнейшей обработке наблюдалось существенное увеличение упругого перемещения в технологической системе, что не позволило продолжать процесс шлифования. Следовательно, удалить весь припуск (1 мм) в данных условиях не представляется возможным. В связи с этим были проведены опыты с меньшей глубиной шлифования  $t=0,01$  мм. Через 50 проходов круга упругое перемещение равно  $y=370$  мкм, а через 100 проходов –  $y=550$  мкм. Как видно, и в этом случае имеют место значительные упругие перемещения в технологической системе, что не позволяет удалить весь снимаемый припуск.

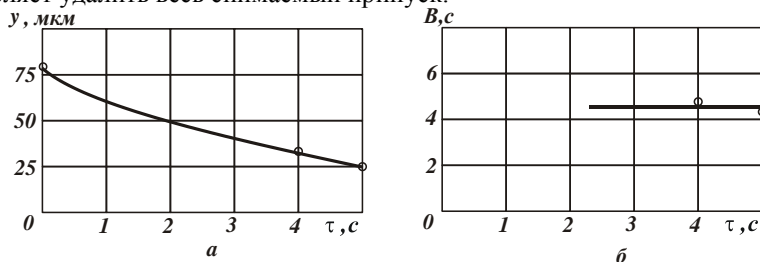


Рисунок 3 – Зависимости величины  $y$  (а) и параметра  $B$  (б) от времени обработки  $\tau$ .

Очевидно, для того чтобы уменьшить величину упругого перемещения в технологической системе, необходимо значительно уменьшить глубину шлифования  $t$ . Однако, это ведет к снижению производительности обработки, что не эффективно. Таким образом, экспериментально показано, что ведение процесса внутреннего шлифования по жесткой схеме в данных условиях не целесообразно. Такие большие значения  $y$  и безразмерного параметра  $B_1$  обусловлены низкой жесткостью технологической системы, равной

$$C = 260 \text{ кГс/мм.}$$

Для сравнения были определены параметры В и В1 при круглом наружном и плоском шлифовании. В первом случае измерения величины упругого перемещения  $y$  производились при круглом наружном шлифовании по схеме выхаживания на круглошлифовальном станке мод. 3У143МВ. Обрабатывалась цилиндрическая деталь из стали 45 абразивным кругом 1А1 400х80х203 24А 40 СМ1 К6, скорость круга –  $V_{кр} = 35 \text{ м/с}$ , скорость детали –  $V_{дет} = 13,2 \text{ м/мин}$ , начальный натяг в технологической системе –

$y_0 = 80 \text{ мкм}$ . Как следует из рис. 3,а, через 4 с шлифования величина упругого перемещения уменьшилась с 80 мкм до 35 мкм, а через 5 с шлифования – до 25 мкм.

Используя расчетную зависимость и экспериментальные значения упругого перемещения  $y = 35 \text{ мкм}$  и  $25 \text{ мкм}$  соответственно для  $\tau = 4 \text{ с}$  и  $5 \text{ с}$ , определен параметр В. В первом случае он равен 4,88с, во втором случае – 4,27с, рис. 3,б. По сравнению с внутренним шлифованием (рис. 2,б), при круглом наружном шлифовании параметр В значительно меньше. Это связано с более высокой жесткостью технологической системы при круглом наружном шлифовании.

Были также проведены экспериментальные исследования упругих перемещений при плоском шлифовании по жесткой схеме на плоскошлифовальном станке мод. 3Л722В с использованием абразивного круга 1А1 400х80х203 24А 40 СМ1 К6. Съём припуска осуществлялся за один проход круга с глубиной шлифования  $t = 0,05 \text{ мм}$ ;  $V_{кр} = 35 \text{ м/с}$ ;  $V_{дет} = 24 \text{ м/мин}$ . В результате установлено, что фактическая глубина шлифования при этом составила  $t_{ф} = 30 \text{ мкм}$ , а  $y = 20 \text{ мкм}$ . Для определения безразмерного параметра  $B_1$  была использована аналитическая зависимость (4). Подставляя в нее исходные данные:  $n = 1$ ;  $y = 20 \text{ мкм}$ ;  $t = 50 \text{ мкм}$ , получено уравнение относительно неизвестной величины  $B_1$ :

$$B_1 \cdot \left( 1 - e^{-\frac{1}{B_1}} \right) = 0,4 . \quad (6)$$

Решая уравнение, установлено  $B_1=0,45$ . Как видно, данное значение  $B_1$  значительно меньше аналогичных значений  $B_1=60\dots63$ , полученных при круглом внутреннем продольном шлифовании. Это связано с более высокой жесткостью технологической системы при плоском шлифовании.

Как показывает практика шлифования внутренних цилиндрических поверхностей зубчатых колес приводов шахтных конвейеров, на точность обработки значительное влияние оказывают термоупругие деформации детали, возникающие в процессе шлифования. Особенно опасен неравномерный нагрев обрабатываемой детали. Поэтому с целью обеспечения равномерного охлаждения после шлифования обрабатываемая деталь не снимается со станка до ее полного охлаждения. Это приводит к повышению трудоемкости операции шлифования. Чтобы оценить возможности уменьшения степени нагрева детали при шлифовании, определим работу резания, которая практически полностью превращается в теплоту. Количество тепла, выделяющегося при резании, равно

$$Q = \int_0^{\tau} N \cdot \tau \cdot d\tau , \quad (7)$$

где  $N \cdot \tau = P_z \cdot \tau \cdot V_{кр}$  – мощность шлифования, Вт.

При врезном шлифовании  $P_z \cdot \tau$  с учетом зависимости (1) выражается

$$P_z \cdot \tau = K_{ш} \cdot P_y \cdot \tau = K_{ш} \cdot c \cdot y = K_{ш} \cdot c \cdot y_{уст} \cdot \left( 1 - e^{-\frac{\tau}{B}} \right) . \quad (8)$$

Подставляя зависимость (8) в (7), имеем

$$Q_{врез} = K_{ш} \cdot c \cdot B \cdot y_{уст} \cdot \left( \frac{\tau}{B} + e^{-\frac{\tau}{B}} - 1 \right) . \quad (9)$$

При шлифовании этого же образца по схеме выхаживания (с начальным натягом  $y_0$ ) величина упругого перемещения  $y$  определится зависимостью (2). Соответственно, тангенциальная составляющая силы резания  $P_z \cdot \tau$  равна

$$P_z \cdot \tau = K_{ш} \cdot P_y \cdot \tau = K_{ш} \cdot c \cdot y = K_{ш} \cdot c \cdot y_0 \cdot e^{-\frac{\tau}{B}} . \quad (10)$$

Подставляя зависимость (10) в (7), имеем

$$Q_{вых} = K_{ш} \cdot c \cdot B \cdot y_0 \cdot \left( 1 - e^{-\frac{\tau}{B}} \right) . \quad (11)$$

На рис. 4,а заштрихованным показаны площади, соответствующие значениям  $Q_{\text{врез}}$  и  $Q_{\text{вых}}$ . Как видно, с увеличением времени обработки  $\tau$  величины  $Q_{\text{врез}}$  и  $Q_{\text{вых}}$  увеличиваются, однако с разной интенсивностью. Так  $Q_{\text{врез}}$  увеличивается более интенсивно. Поэтому оценим соотношение  $Q_{\text{врез}}/Q_{\text{вых}}$  для  $y_{\text{уст}} = y_0$  и  $B=440$  с, рис. 4. Как видно, с увеличением  $\tau$  соотношение  $Q_{\text{врез}}/Q_{\text{вых}}$  увеличивается. При  $\tau/B=4$  соотношение  $Q_{\text{врез}}/Q_{\text{вых}}=3,075$ . Следовательно, съём всего припуска по схеме выхаживания при внутреннем шлифовании зубчатого колеса позволяет в 3 раза уменьшить тепловыделения по сравнению с врезным шлифованием (по жесткой схеме). Несомненно, это приведет к снижению температуры шлифования и времени охлаждения обрабатываемой детали, что в конечном итоге позволит снизить термоупругие деформации обрабатываемой детали и трудоемкость операции шлифования.

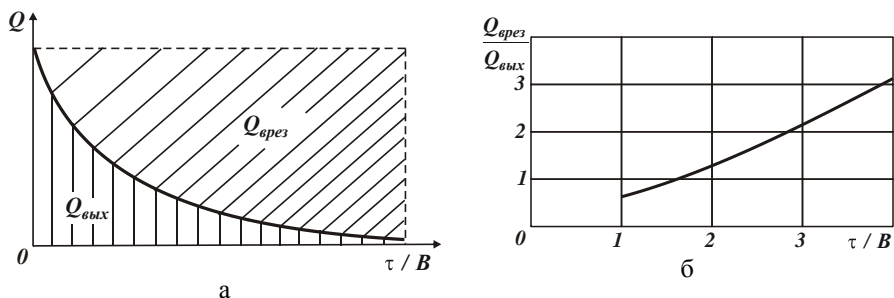


Рисунок 4 – (а) Характер изменения величин  $Q_{\text{врез}}$  и  $Q_{\text{вых}}$  при изменении  $\tau/B$ ;

(б) - зависимость  $Q_{\text{врез}}/Q_{\text{вых}}$  от  $\tau/B$

**Выводы.** На финишных операциях обработки внутренних цилиндрических поверхностей зубчатых колес приводов шахтных конвейеров традиционно используется внутреннее продольное шлифование по жесткой схеме с периодическим выхаживанием. Операция обработки весьма трудоемка, длится более трех часов при съеме припуска 0,5 мм на сторону. Проведенные теоретические и экспериментальные исследования показали, что в условиях шлифования с низкой жесткостью в технологической системе целесообразно съём всего припуска производить по схеме выхаживания, т.е. с отключенной радиальной подачей, создавая в системе начальный натяг, равный или кратный величине снимаемого припуска. При этом эффективность обработки возрастает с увеличением снимаемого припуска. В

связи с этим, данная схема обработки положена в основу совершенствования операции внутреннего шлифования зубчатых колес.

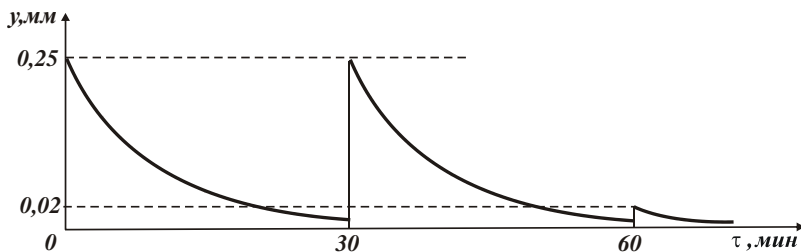


Рисунок. 5 – Характер изменения величины  $y$  с течением времени обработки  $\tau$ .

Опытами установлено, что съем припуска величиной 0,5 мм на сторону может быть произведен за три перехода. На первом переходе в технологической системе создается начальный натяг величиной 0,25 мм, и обработка осуществляется фактически до момента прекращения искрения в зоне резания. При этом обеспечивается точность размера обрабатываемой поверхности на уровне 10–20 мкм. На втором переходе в технологической системе повторно создается натяг величиной 0,25 мм и обработка опять же производится до момента прекращения искрения в зоне резания. Затем оставшийся припуск величиной до 20 мкм удаляется на третьем переходе так же по схеме выхаживания, рис. 5. В результате реализации данной структуры операции внутреннего шлифования производительность обработки увеличилась почти в 2 раза. Продолжительность операции уменьшилась до 2 часов. При этом обеспечиваются требуемые параметры точности и шероховатости обработки. Существенно (с 60 до 30 минут) уменьшилось также время охлаждения обрабатываемой детали после шлифования, которое осуществляется без съема нагретой детали со станка с целью устранения ее термоупругих деформаций и повышения таким образом точности обработки. Это свидетельствует об уменьшении выделяемого при резании тепла, что согласуется с приведенными выше теоретическими решениями.

**Список литературы:** 1. Управление процессом шлифования / А.В. Якимов, А.Н. Паршаков, В.И. Сверцев, В.П. Ларшин. – К.: Техніка, 1983. – 182 с. 2. Тверской М.М. Автоматическое управление режимами обработки деталей на станках / М.М. Тверской. – М.: Машиностроение, 1982. – 208 с. 3. Рябенков И.А. Повышение эффективности финишной обработки деталей гидроаппаратуры на основе выбора рациональной структуры и параметров операций: автореф. дис. на соискание научн. степени канд. техн. наук: спец. 05.02.08 “Технология машиностроения” / И.А. Рябенков. – Одесса, 2009. – 21 с. 4. Физико-математическая теория процессов обработки материалов и технологии машиностроения / Под общ. ред. Ф.В. Новикова и А.В. Якимова. В десяти томах. – Т. 1. “Механика резания материалов” – Одесса: ОНПУ, 2002. – 580 с. 5. Новиков Ф.В. Повышение точности и производительности механической обработки / Ф.В. Новиков, Р.А. Бережной // Вісник Харківського національного технічного університету сільського господарства ім. Петра Василенка. – 2009. – Вип. 81. – С. 29-38.

Надійшла до редколегії 31.05.2010